



# 5G SA 网络引入 IPv6 的思路探讨

## IPv6 Deployment in 5G SA Network

马晨昊 /MA Chenhao<sup>1</sup>, 解冲锋 /XIE Chongfeng<sup>1</sup>, 郑伟 /ZHENG Wei<sup>2</sup>, 李聪 /LI Cong<sup>1</sup>

(1. 中国电信股份有限公司研究院, 北京 102209;  
2. 中国电信股份有限公司江苏分公司, 江苏 南京, 210037)  
(1. China Telecom Research Institute, Beijing 102209, China;  
2. China Telecom Jiangsu Branch, Nanjing 210037, China)

**摘要:** 针对 5G 独立组网 (SA) 网络引入 IPv6, 分析了 5G SA 用户面引入 IPv6 单栈的可能方案; 特别提出了一种新型的基于 IPv6 单栈技术方案, 详细介绍了其中的总体结构、冗余备份、端口映射和溯源方式等。相比于传统的双栈技术, 新的技术方案不仅解决了终端地址不足问题, 还可以降低网络维护的成本, 符合网络的发展趋势。最后, 提出了运营级网络选择演进路线的策略建议。

**关键词:** 5G SA; IPv6 单栈; NAT64; 端口映射

**Abstract:** Focusing on the issue of deployment of IPv6 in 5G standalone (SA) network, different solutions of introducing IPv6 into 5G SA user plane are illustrated. In particular, a new IPv6-only solution is introduced, including its overall architecture, redundancy, port mapping and traceability solutions. Compared with the traditional dual-stack approach, the new one solves the problem of terminal addresses shortage, and helps to reduce the cost of network maintenance, which is in accordance with the trend of the network development. In the end, a strategy proposal for the carrier-grade network to choose the migration path is proposed.

**Keywords:** 5G SA; IPv6-only; NAT64; port mapping

DOI: 10.12142/ZTETJ.202003009

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20200622.0902.002.html>

网络出版日期: 2020-06-22

收稿日期: 2020-04-15

**作**为新一版互联网网络层协议, IPv6 在全球受到越来越多的重视。根据谷歌最新统计, 现在全球约有 30% 的用户开始使用 IPv6, 其中以欧美发达国家的 IPv6 发展最为领先。在 2016 年, IETF 就发表声明, 要求新的协议制定或协议扩展不要兼容 IPv4, 而要基于 IPv6。在中国, 自从 2017 年底中共中央办公厅和国务院

办公厅发布 IPv6 行动计划发布以来, 在运营商和 OTT (指互联网公司越过运营商) 等产业各界的协作下, 中国 IPv6 发展迅速, 分配了 IPv6 地址的用户数、IPv6 活跃用户数和流量增长迅速。与此同时, 作为新一代移动通信技术, 5G 也处于商用化部署的关键期。选择合适的网络协议和最佳功能配置是发展 5G 的关键。5G 和 IPv6 是构建中国新一代信息基础设施的两项重要技术支柱, 它们在新时期的相遇和融合, 是信息技术发展的必然。幸运的是,

在 3GPP 标准设计和设备实现上, 5G 已能良好地支持 IPv6 协议; 但是 5G 网络引入 IPv6 协议的技术路线, 在 3GPP 的相关标准中并没有详细和明确的说明。例如, 如何发挥 IPv6 的技术优势来提升网络的综合能力? 如何处理 IPv6 和 IPv4 的关系? 等。5G 网络引入 IPv6 涉及端、管、云等多个环节, 如果处理不好, 会对未来 5G 网络甚至互联网的发展产生不利影响。在 5G SA 部署过程中, 是延续传统继续部署双栈, 还是破旧立新, 直接采用 IPv6

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (2018YFB1800400)

单栈? 针对以上问题, 本文中, 我们在分析 5G 网络引入 IPv6 面临的挑战的基础上, 重点介绍和分析了不同的 IPv6 过渡方案, 特别论述了 5G SA 网络用户面引入 IPv6 单栈的新型技术方案, 并对其组网架构、冗余备份、端口映射和溯源方案做了详细介绍。在以上论述的基础上, 提出了运营商选择 IPv6 演进路线的策略建议。

## 1 5G 引入 IPv6 的主要问题及可选技术方案

5G 引入 IPv6 主要涉及 3 个层面: 用户面、控制面和承载面。用户面是与用户数据传输相关的层面, 它直接面向用户终端并直接为用户提供接入服务, 是 IP 地址消耗最大的层面; 控制面是指核心网设备之间的互连并且进行核心网协议交互的层面; 承载面是指城域网、骨干网等用于承载控制面和用户面的网络。每个层面都涉及到 IPv6 引入, 策略上也会有所不同。考虑到篇幅因素, 我们主要讨论用户面的 IPv6 引入问题。5G 引入 IPv6 时, 所使用的技术方案原则上不影响 5G 原有功能和性能, 并且尽可能发挥 IPv6 的技术优势来创建能力更高、成本更低的网络。当前 5G 引入 IPv6 的需要考虑如下几个因素:

1) 海量多业务承载。5G 需要承载的业务更加多样, 不仅支持传统的宽带上网业务, 还要支持物联网 (IoT)、移动边缘计算 (MEC)、车用无线通用技术 (V2X) 等新兴业务, 这主要对 IP 网络层提出 IP 地址数足够多、连接足够多、业务保持高稳定互通的要求。

2) 高性能保障。5G 网络性要求更为苛刻, 同时 4K/8K 高清视频、远程医疗、云游戏、远程驾驶、工业控制等增强移动宽带 (eMBB) / 超可靠低时延通信 (URLLC) 应用需求也日

趋紧迫, 它们对网络提出了超低时延、超大带宽的要求。而这些性能需求与网络用户面紧密相关, 需要用户面提供高效的数据处理和转发。

3) 安全可溯源。由于面向的场景更加多样, 5G 的连接数将会达到一个较高的数量级, 所传递的内容也将更为复杂。出于安全考虑, 用户面须提供完善的寻址方案和溯源方案, 以确保用户和终端的访问行为可追溯。

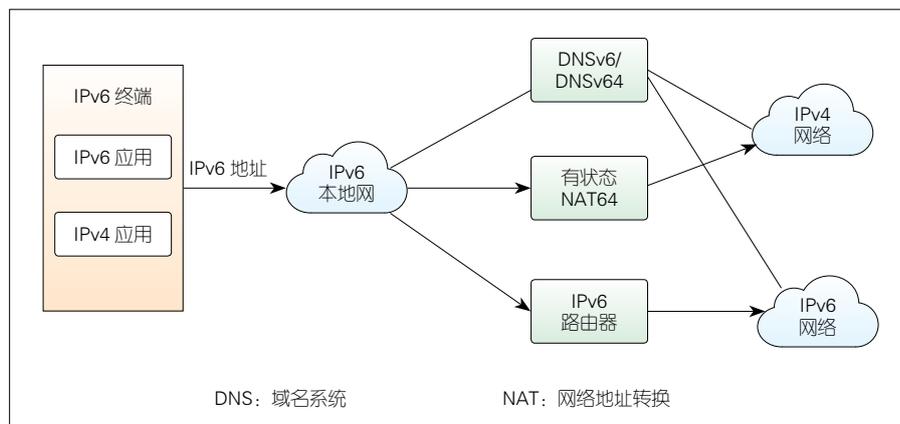
目前中国的 IPv6 部署主要采用双栈方式。网络给用户终端分配和维护 IPv4 地址和 IPv6 地址<sup>[1]</sup>, 支持 IPv6 业务和 IPv4 业务的访问, 两种协议逻辑上独立。由于当前 IPv4 地址极其稀缺, 因此移动网络通常给用户分配私有 IPv4 地址, 并在网络中部署支持网络地址转换 (NAT) 的设备进行公私有地址的转换。随着时间的推移, 双栈技术方案也日益暴露其缺点, 例如: 双栈并没有解决地址不足问题, 有些场景下用户的私有地址也发生冲突; 此外, 双协议栈的维护成本高等。

IPv6 单栈方案是以 IPv6 为基础协议建立的终端编址和业务承载体系。该方案构建在翻译技术的基础上, 在终端只有 IPv6 地址的情况下, 支持对 IPv6 和 IPv4 业务的访问。该方案的核心是 NAT64/DNS64 (DNS 指域名系统) 技术。NAT64<sup>[2]</sup> 是一种有状态的网络

地址与协议转换技术, 用于 IPv6 客户端和 IPv4 业务端传输控制协议 (TCP)、用户数据报协议 (UDP)、Internet 控制报文协议 (ICMP) 下的 IPv6 与 IPv4 网络地址和协议转换, 实现只拥有 IPv6 地址的终端发起连接访问 IPv4 侧网络资源。

在 IPv6 单栈网络中, 终端从网络侧只获得 IPv6 地址, 终端上存在支持 IPv6 的应用客户端, 也存在只支持 IPv4 的应用客户端。如图 1 所示, 当终端发起连接访问普通 IPv6 网站或其他服务器时, 流量将会匹配 IPv6 默认路由并直接转发至 IPv6 路由器处理, 正常访问 IPv6 网络中的资源。

当客户端去访问只支持 IPv4 协议栈的网站或服务时, 其目的 IPv4 地址需要由 DNS64<sup>[3]</sup> 服务器添加 IPv6 前缀 Pref64 来合成 IPv6 地址。其过程为: 终端向支持 DNS64 的 DNS 递归服务器发出 AAAA 类解析请求时, 如果权威服务器返回的记录为 RCODE=3 (名字错误, 表示请求中的域不存在), 说明该域名对应的服务器为 IPv4 单栈服务器。此时 DNS64 继续查询, 发出 A 类请求查询, 并获得 A 类查询结果。DNS64 支持将 DNS 查询信息中的 A 记录 (IPv4 地址) 合成到 AAAA 记录 (IPv6 地址) 中, 即为 IPv4 应用服务器的 IPv4 地址通过添加 IPv6 前缀 Pref64 映



▲图 1 IPv6 单栈方案示意图

射成了 IPv6 地址，并将生成的 AAAA 类结果返回给客户端。

在有些情况下，IPv4 网络侧的 IPv4 地址没有经过 DNS64 的处理直接到达 IPv6 单栈客户端里。此时，支持 RFC7050 协议<sup>[4]</sup>的 DNS64 服务器会把前缀 Pref64 下发至终端，终端可使用本地合成前缀的方式将目的 IPv4 地址合并成 IPv6 地址。

在获得 AAAA 类的解析结果后的该流量将被路由转发至 NAT64 路由器上，IPv6 与 IPv4 地址和协议在 NAT64 上进行合成转换，从而实现访问 IPv4 网络中的资源。需要补充说明的是，NAT64 设备中将 IPv4 地址合成 IPv6 地址采用的前缀 Pref64 与 DNS64 中采用的合成前缀 Pref64 是一致的。

## 2 5G SA 引入 IPv6 单栈的技术方案

### 2.1 5G 组网方案

结合 3GPP 的 5G 标准<sup>[5]</sup>和 IPv6 单栈的思路，我们建议的组网方案如图 2 所示。在 IPv6 单栈接入的环境下，终端只被分配了 IPv6 地址。为了

支持 IPv6 单栈终端访问支持 IPv4 协议的网站或者应用，在 5G 的用户面功能（UPF）位置部署支持 NAT64 设备，并在部署的 DNS 服务器升级支持 DNS64 和 RFC7050 协议，通过 IPv4 和 IPv6 翻译实现对于 IPv4 网站或者应用的访问。对于 NAT64 和 DNS64 的部署方式，NAT64 的部署可采取分布式、集中式或混合式。我们建议运营商根据实际需求选择具体部署方式。

在实际的部署中 NAT64 存在两种形态：插卡式 NAT64 设备和具备 NAT64 功能的专用设备。它们的部署方案也因此略有不同，具体介绍如下：

1) 插卡式 NAT64 设备。插卡式 NAT64 方案如图 3 所示，NAT64 板卡插于用户边缘路由器（CE）路由器上。正常状态下，板卡之间负载分担，若一块板卡发生故障，正常板卡承担全部业务。设备的冗余建议采用热备的方式备份，并且配置一致，同步 NAT64 会话信息，主备切换后用户无感知。在寻址和路由方面，我们建议不同的 CE 配置不同的 IPv4 地址池，配置相同的 IPv6 合成前缀 Pref64。在 IPv6 侧发布相同的 IPv6 合成前缀

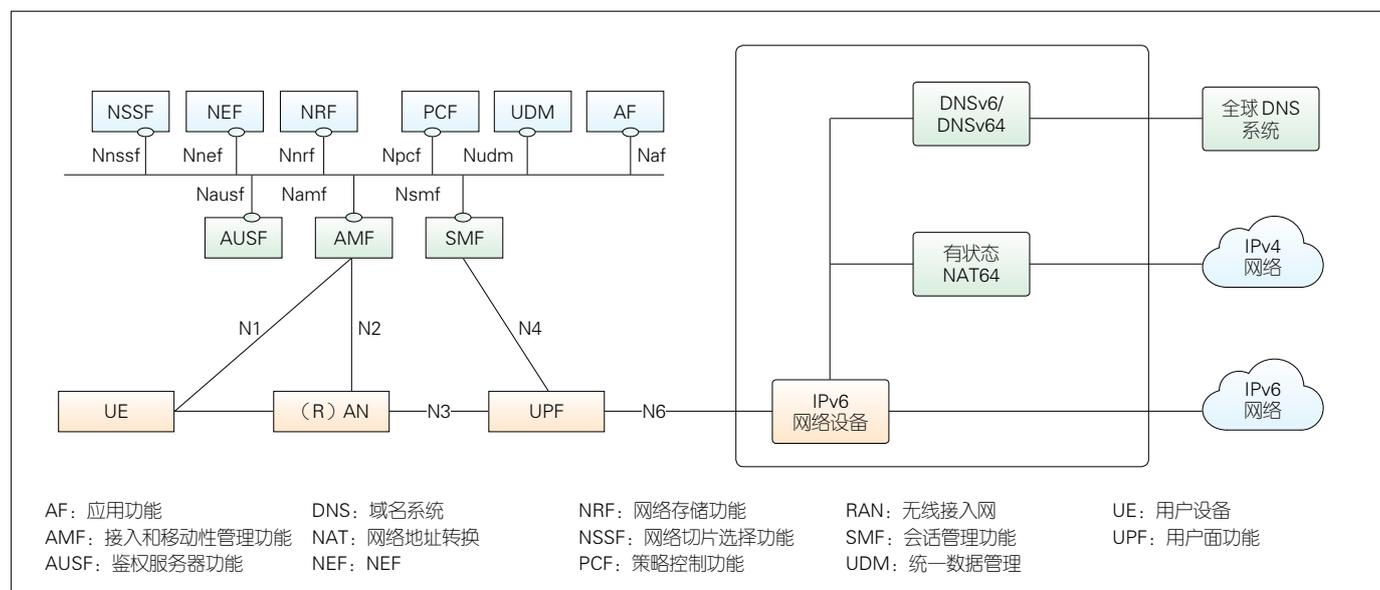
Pref64，在 IPv4 侧由于 IPv4 地址池不同，因此发布不同的 IPv4 路由。

2) 具备 NAT64 功能的专用设备。专用设备方案如图 4 所示，建议将设备侧挂于 CE 上路由器，设备之间通过接口互联。设备的冗余采用“1+1”的方式，正常状态下两台设备之间负载分担，若一台故障，另一台设备提供冗余。两台设备间通过热备方式备份，并且同步 NAT64 会话信息，主备切换后用户无感知。在寻址和路由方面和上述方案一样，主备设备配置不同的 IPv4 地址池和相同的 IPv6 合成前缀 Pref64，相互备份的两台 NAT64 设备在 IPv6 侧发布相同的 IPv6 合成前缀 Pref64，在 IPv4 侧发布不同的路由。

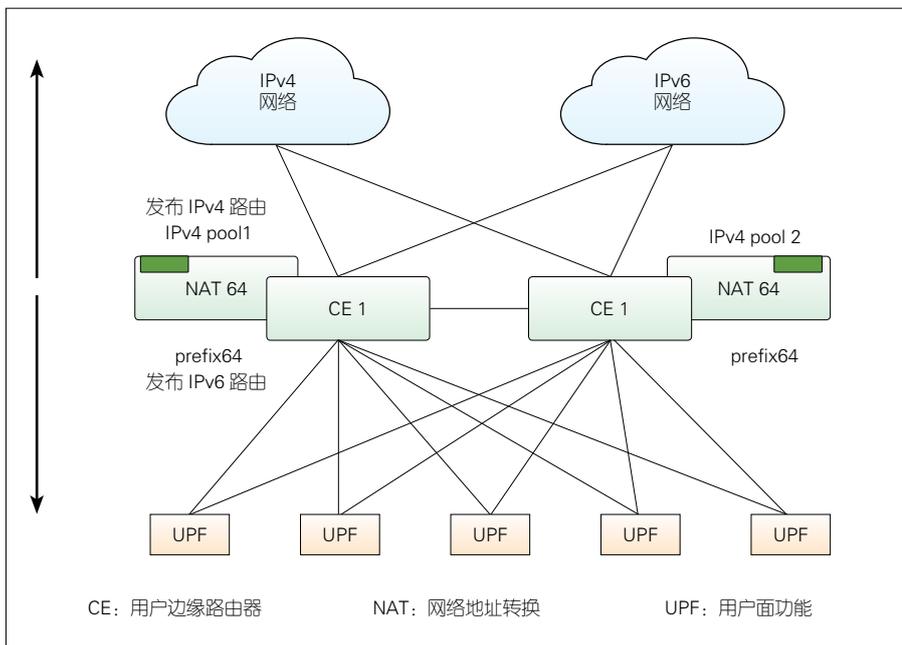
NAT64 功能除了用上述的专用硬件方式实现外，也可以采用虚拟化技术来实现。虚拟化 NAT64 的组网方案和物理设备的功能相同，和其他设备的互连接口也相同；不同之处仅在于 NAT64 功能在虚拟机上实现，考虑到篇幅，在此不做详述。

### 2.2 端口映射方案

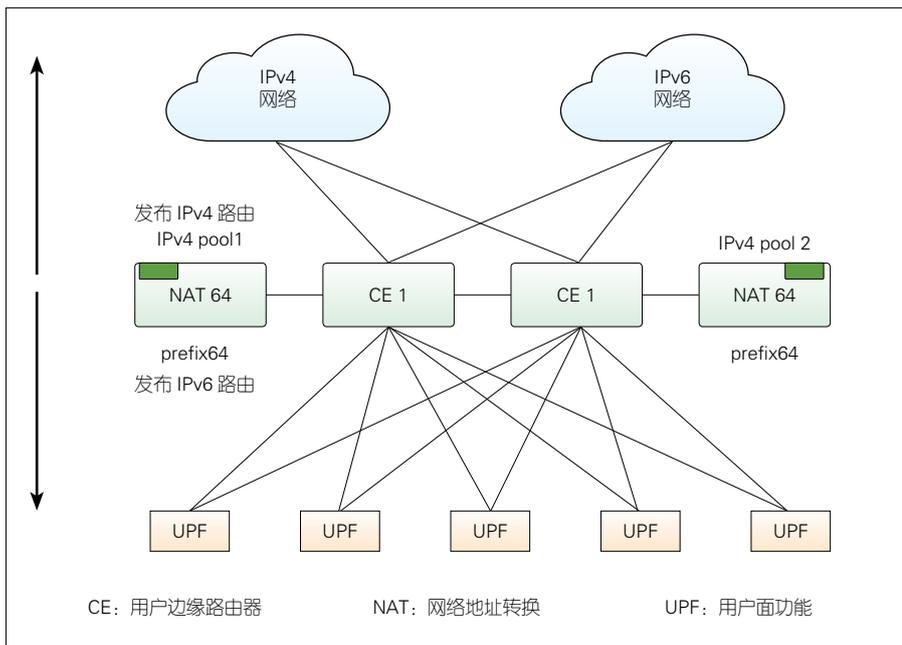
由于 IPv4 资源稀少，因此在



▲图 2 5G 独立组网网络架构图



▲图 3 插卡式 NAT64/ 运营级 NAT (CGN) 方案



▲图 4 专用的 NAT64 设备方案

NAT64 中用户的 IPv6 地址和 IPv4 地址并不是一一对应的。通常情况下，多个用户共享复用单个 IPv4 地址，此时需要进行地址变换和端口层面的映射，并动态建立映射会话。基于端口级建立映射会话，在溯源系统中需要存储大量的用户连接信息表。这会对

NAT64 设备、溯源系统以及设备间的交互接口都带来很大的压力。

为了减小溯源日志的数据量，我们建议使用用户动态分配“IPv4 地址 + 端口段”（简称“IPv4 端口段”）的方式，即采用用户 IPv6 地址和 IPv4 端口段进行动态映射的方式，将映射从端口级

提到端口段级。具体方式列举如下。

1) 当 IPv6 终端发起访问 IPv4 应用的请求时（数据上行）：

(1) 对于目的 IPv6 地址，在 NAT64 中做 IPv6 和 IPv4 协议和地址转换，此过程为无状态；

(2) 对于 IPv6 终端的源地址，在收到用户终端发出的首个数据包时，NAT64 为源 IPv6 地址从资源池中动态选取一个可用的 IPv4 端口段，将源 IPv6 地址变换为该 IPv4 端口段所在的 IPv4 地址，并将该 IPv6 数据包及后续使用该 IPv6 地址的数据包的源端口变换为该 IPv4 端口区间内的端口，利用该端口段在 NAT64 中建立和维护 TCP 和 UDP 的会话映射，在使用完毕后释放该 IPv4 端口段。

2) 当数据流返回时（数据下行）：

(1) 对于目的 IPv4 地址，根据 NAT64 设备中的映射会话将目的地址从 IPv4 转换成 IPv6 地址，同时进行端口和协议的转换；

(2) 对于源 IPv4 地址，在 NAT64 中添加 NAT64 的映射前缀 Pref64，做 IPv4 到 IPv6 地址和协议的转换。

此外，为了支持从 IPv4 访问 IPv6 的需求，我们建议 NAT64 需要同时支持通过手工配置静态映射关系，实现 IPv4 网络主动发起连接访问 IPv6 网络。

### 2.3 漫游考虑

IPv6 单栈对 5G 网络漫游的影响可以从两个场景来分析：运营商内的省间漫游和出国漫游。对于第一种场景，运营商在各省的网络均具为 IPv6 单栈配置，因此漫游用户在不改动终端配置的情况下可以使用 IPv6 单栈省份的环境，此时对于本地路由、回归属路由都没有特别要求；对于第二种情况，如果被访地的运营商网络不是

IPv6 单栈，此时终端可自动开启双栈模式，这样可以使非 IPv6 单栈的网络环境访问互联网。

## 2.4 溯源方案

在 5G IPv6 单栈环境中，由于 NAT64 目前采用的是有状态转换方式，在设备的运行过程中，NAT64 设备需要实时保持 IPv6 地址和端口与 IPv4 地址和端口段间的映射关系。为了支持访问溯源，我们建议将 NAT64 中映射表同步至日志服务器。

溯源方案如图 5 所示，在 5G IPv6 单栈网络中建立地址转换日志系统，其中包括 SYSLOG 日志服务器、数据采集设备、溯源查询服务器。多个服务器协同实现整个用户溯源的流程，数据采集设备采集用户和访问日志信息，NAT64 设备上传用户地址转换记录，两个信息相关联形成可供溯源功能的日志。NAT64 地址转换日志系统根据需求对现有系统进行相应扩展，完成用户地址映射信息的 SYSLOG 方式采集。此外，地址转换系统应能够满足用户级的地址映射信息采集的功能和性能要求。

溯源系统的查询过程就是通过给定的公网地址 + 端口号、映射关系建立的时间戳等信息来查询用户的源 IPv6 地址。这个源 IPv6 地址在 IPv6 单栈网络中是用户终端的公网 IPv6 地址。

## 3 IPv6 单栈的产业发展现状

IPv6 单栈是网络发展的国际趋势。微软、谷歌、苹果和思科等支持 IPv6 单栈的发展，特别是谷歌和苹果等在其 iOS 和 Android 终端产品中很早就实现了 IPv6 单栈的支持，即在给终端分配 IPv6 单栈地址的情况下，也可完成原有双栈的功能。在运营商方面，T-mobile、Sprint、Reliance Jio、

Orange、SK、Telstra 和 Rogers 等在 4G 时期就已经部署或者试验了 IPv6 单栈技术；但在中国，对于 IPv6 单栈技术的规模验证仍然缺乏，因此需要加强规模部署的研究和现网实验。

## 4 运营商 5G 网络引入 IPv6 的路线选择

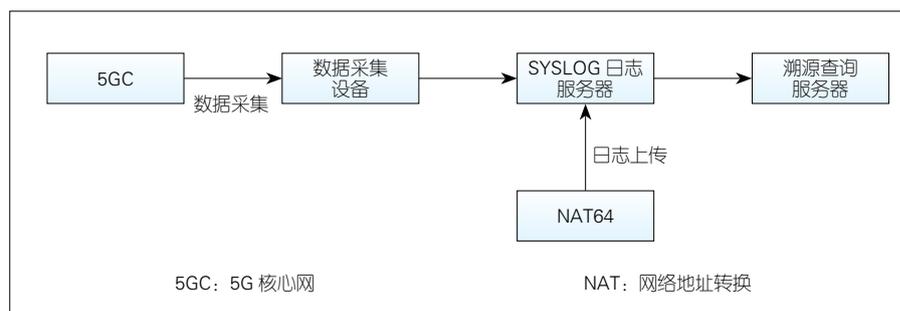
IPv6 单栈方案也可以解决网络中 IP 地址不足带来的编址问题。在传统网络中，不仅公有 IPv4 地址被耗尽，而且私有 IPv4 地址也紧缺，甚至会发生私有地址复用的现象。新兴业务如 IoT、V2X 和 MEC 等，对于编址提出了更高的要求，需要采用 IPv6 来解决编址问题。从双栈演进为 IPv6 单栈方案，在运维方面简化了网络管理，减少了访问控制列表（ACL）、路由配

置和管理工作量。在安全方面，单栈替代双栈，减少协议暴露面，降低了安全风险。终端采用唯一的公有 IPv6 地址也增强了溯源能力。

在当前激烈的市场竞争中，运营商注重业务的互通性和用户的体验。在设备能力具备及部署合理的前提下，IPv6 单栈技术方案可满足运营商这方面的要求。我们建议运营商根据自己的 IPv4 地址富余量、产业情况、政府政策及终端支持等因素综合考虑来选择路线。下面对 IPv6 单栈技术与 IPv4/IPv6 双栈技术的分析对比，具体如表 1 所示。

## 5 结束语

移动网络只给终端分配 IPv6 地址。在单 IPv6 地址的情况下，移动终



▲图 5 日志溯源系统组成示意图

▼表 1 双栈方案和 IPv6 单栈方案的对比

	IPv6 单栈方案	IPv4/IPv6 双栈方案
给用户终端分配 IP 地址类型	给用户终端只分配 IPv6 地址	给用户终端分配（私网）IPv4 地址和 IPv6 地址
支持的业务类型	IPv4、IPv6、双栈业务	IPv4、IPv6、双栈业务
网络侧 NAT 转化方式	6-4 转换	4-4 转换
安全性	单协议栈，暴露面少，安全性较高	双协议栈，暴露面高，安全风险相对较高
维护成本	单协议栈配置工作量较少，维护成本较低	双栈网络每个设备都要配置双协议栈，配置工作量较大，维护成本较高
转化设备成熟度	NAT64 在中国应用较少，但其他国家有多项规模应用案例	NAT44 成熟，在中国应用较多
转化设备成本	NAT64 的成本和 NAT44 基本相同	NAT44 的成本和 NAT64 基本相同
终端成熟度	成熟，苹果 iOS 和安卓均支持 IPv6 单栈	成熟
对于 DNS 服务器要求	支持 DNS64	/
Gi 口是否需要 IPv4 地址池	需要	需要

DNS: 域名系统

iOS: 苹果的移动操作系统

NAT: 网络地址转换

端不但能支持 IPv6 单栈业务，也能支持对 IPv4/IPv6 双栈及 IPv4 单栈业务的访问，使用户体验不会因为缺少 IPv4 地址而发生变化。需要说明的是，IPv6 单栈技术本身不提倡广泛使用 NAT64，而是希望实现 NAT64 转化的流量在总流量中的占比越来越少，而端到端的 IPv6 流量占比越来越大，因此使 OTT 的业务向 IPv6 进一步迁移。本文中，我们对 5G 引入 IPv6 的思路进行了探讨，介绍了 IPv6 单栈下 5G 的基本技术、组网方案、映射和溯源方案，为 5G 运营商的 IP 网络演进技术路线的选择提供参考。5G IPv6 单栈化将是网络向 IPv6 演进的重要一步，除了技术的因素外，OTT 企业和运营商各方的协同合作也是最终关键的关键。

**致谢**

本研究的实验工作得到了国家下一代互联网工程中心李震博士的协助，在此谨致谢意！

**参考文献**

- [1] ETSI. General packet radio service (GPRS) enhancements for evolved universal terrestrial radio access network (E-UTRAN) access (3GPP TS 23.401 version 10.3.0 Release 10): TS 123 401 V10.3.0 LTE[S]. 2011
- [2] BAGNULO M, MATTHEWS P, VAN BEIJNUM I. Stateful NAT64: network address and protocol translation from IPv6 clients to IPv4 servers: IETF RFC6146[S]. 2011
- [3] BAGNULO M, SULLIVAN A, MATTHEWS P, et al. DNS64: DNS extensions for network address translation from IPv6 clients to IPv4 servers: IETF RFC6147[S]. 2011
- [4] SAVOLAINEN T, KORHONEN J, WING D. Discovery of the IPv6 prefix used for IPv6 address synthesis: IETF RFC7050[S]. 2013
- [5] 3GPP. System architecture for the 5G system: 3GPP TS 23.501[S]. 2018

**作者简介**



马晨昊，中国电信股份有限公司研究院新兴信息技术研究所工程师；主要研究方向为 IPv6/SRv6、未来网络技术等。



解冲锋，中国电信股份有限公司研究院教授级高级工程师；主要研究方向为网络架构及演进、下一代互联网/IPv6、SDN/NFV、网络移动性、物联网及互联网安全等；发表论文 15 篇。



郑伟，中国电信股份有限公司江苏分公司工程师；主要研究方向为 5G 核心网、物联网、IPv6 等。



李聪，中国电信股份有限公司研究院新兴信息技术研究所工程师；主要研究方向为未来网络架构、新型网络技术等。